

## ВЫСОКАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs

© Т.И.Воронина, Т.С.Лагунова, М.П.Михайлова,  
К.Д.Мусеев, Ю.П.Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 17 мая 1995 г. Принята к печати 31 мая 1995 г.)

Приведены сравнительные исследования гальваномангнитных свойств твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ , обогащенных GaSb ( $x = 0.15-0.22$ ), выращенных изопериодными с подложками GaSb и InAs методом жидкофазной эпитаксии. В гетероструктурах с нелегированными слоями GaInAsSb, выращенных на подложке  $p$ -InAs, получено высокое значение холловской подвижности  $u_H = 50000-65000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$ , тогда как для аналогичных слоев того же состава, выращенных на подложке  $p$ -GaSb, максимальная подвижность достигала  $u_H = 2600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Наблюдаемый эффект высокой подвижности объясняется наличием электронного канала на гетерогранице в разъединенном гетеропереходе II типа  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs.

Твердые растворы в системе Ga-In-As-Sb могут быть выращены изопериодными к подложкам GaSb и InAs методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1,2]. Изменяя состав твердой фазы эпитаксиального слоя, можно менять ширину запрещенной зоны твердых растворов и создавать на их основе светодиоды, в лазеры и фотоприемники, работающие в диапазоне длин волн 2-3 мкм [3-5]. В работе [6] было показано, что широкозонные твердые растворы GaInAsSb с шириной запрещенной зоны  $E_g \sim 0.5-0.6 \text{ эВ}$ , выращенные на подложке GaSb, образуют ступенчатые гетеропереходы II типа. В то же время твердые растворы GaInAsSb того же состава, выращенные на подложке InAs, образуют разъединенные гетеропереходы II типа [7]. Отличительной чертой гетеропереходов II типа является пространственное разделение электронов и дырок на гетерогранице. В разъединенном гетеропереходе II типа валентная зона широкозонного полупроводника, GaInAsSb, лежит по энергии выше зоны проводимости узкозонного, InAs. Это приводит к тому, что в равновесии электроны из валентной зоны GaInAsSb перетекают в зону проводимости InAs. В таком гетеропереходе вблизи гетерограницы сосуществуют электронный и дырочный каналы. Различие в характеристиках ступенчатых и разъединенных гетеропереходов II типа ведет к существенному отличию электрофизических и

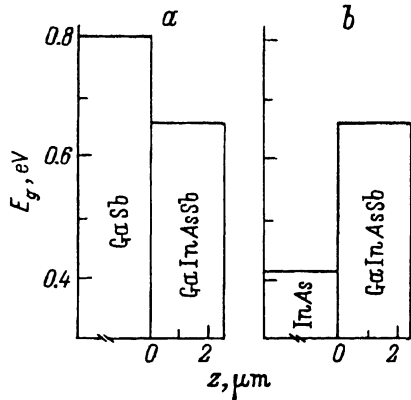


Рис. 1. Послойные профили ширины запрещенных зон исследуемых структур, выращенных на подложках: а) — GaSb, б) — InAs.  $T = 77$  К

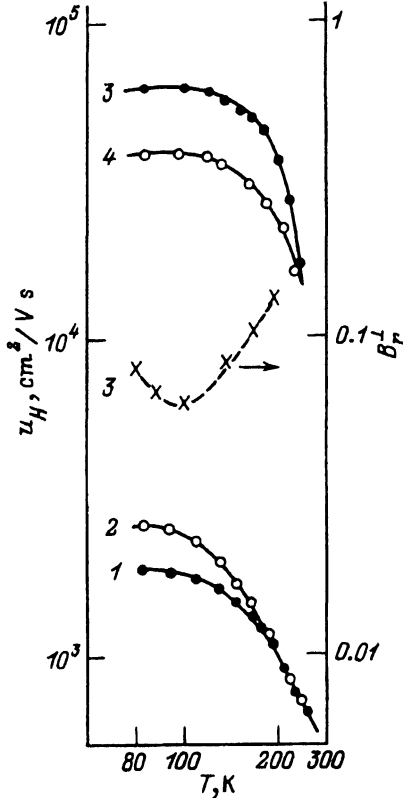


Рис. 2. Зависимости холловской подвижности ( $u_H$ ) и коэффициента магнитосопротивления ( $B_T$ , штриховая кривая) от температуры для твердых растворов GaInAsSb, выращенных на подложках GaSb (1, 2) и InAs (3, 4). Нумерация кривых соответствует нумерации образцов в таблице.

транспортных свойств носителей тока в гетероструктурах, полученных на их основе [8]. Это обстоятельство необходимо учитывать также при создании оптоэлектронных приборов на основе твердых растворов GaInAsSb.

В данной работе приведены сравнительные результаты исследований гальваномагнитных свойств двух типов гетероструктур на основе нелегированных твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , обогащенных GaSb и выращенных на подложках  $p$ -GaSb и  $p$ -InAs. Были измерены коэффициент Холла  $R_H$ , электропроводность  $\sigma$ , подвижность носителей  $u_H = R_H \sigma$  и относительное магнитосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  в интервале температур 77–300 К в магнитных полях до 12 кЭ.

Эпитаксиальные слои твердых растворов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  в интервале составов  $0.15 < x < 0.22$  и  $0.13 < y < 0.26$  были получены методом ЖФЭ при  $T = 873$  К на подложках InAs(100) и GaSb(100). Для приготовления расплавов использовались галлий, индий и сурьма чистотой 99.9999%, а также нелегированные арсенид и антимонид индия и антимонид галлия. Приготовленные расплавы предварительно не легировались. Толщины эпитаксиальных слоев лежали в интервале 2–5 мкм. Рассогласование выращенных слоев с подложкой составляло: для InAs —  $\Delta a/a < \pm 2 \cdot 10^{-4}$ , для GaSb  $\Delta a/a < 5 \cdot 10^{-4}$  ( $T = 300$  К). Послойные профили ширины запрещенных зон исследуемых структур приведены на рис. 1.

Образцы для проведения гальваномагнитных исследований вырезались из структур в форме прямоугольника без удаления подложки.

На эпитаксиальный слой наносили 5 индиевых контактов. Для того чтобы исследовать гальваномагнитные свойства данных твердых растворов, необходимо было исключить влияние подложки на измеряемые величины. С целью изоляции эпитаксиального слоя от подложки мы использовали высокоомные подложки как GaSb, так и InAs с концентрацией носителей на 2 порядка ниже, чем концентрация носителей в наращиваемых слоях твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ .

В случае гетероструктур GaInAsSb/GaSb в качестве подложки использовался полуизолирующий эпитаксиальный слой  $p$ -GaSb, выращенный в присутствии нейтрального растворителя Pb, в котором концентрация дырок составляла  $p_{77\text{K}} \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а удельная проводимость  $\sigma_{77\text{K}} < 0.01 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [9]. В случае гетероструктур GaInAsSb/InAs в качестве подложки был взят сильно компенсированный  $p$ -InAs ( $p_{77\text{K}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sigma_{77\text{K}} = 0.1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ). Эта подложка так же, как в случае  $p$ -GaSb, была полуизолирующей, однако лишь в интервале температур  $T = 77\text{--}200 \text{ К}$ . Выше 200 К в InAs при малой концентрации носителей и сильной компенсации примесей начинала проявляться собственная проводимость и измерения параметров  $R_H$ ,  $\sigma$  и  $u_H$  искажались влиянием подложки.

В интервале температур 77–200 К в магнитных полях до 12 кЭ при токах  $I = 50\text{--}100 \text{ мкА}$ , когда выполняется закон Ома, измерялись ЭДС Холла  $V_H$  и напряжение на потенциальных зондах  $V_0$  в зависимости от магнитного поля. Величина холловской подвижности рассчитывалась из данных  $V_H$  и  $V_0$  по формуле

$$u_H = \frac{V_H}{V_0} \frac{\Delta l}{dH}, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  — расстояние между зондами  $V_0$ ,  $d$  — ширина образца,  $H$  — напряженность магнитного поля. Магнитосопротивление рассчитывалось по формуле

$$\Delta\rho/\rho = \frac{V_{\sigma H} - V_{\sigma 0}}{V_{\sigma 0}}. \quad (2)$$

Тип носителей тока определялся по знаку ЭДС Холла и по знаку термоэдс, измеренной непосредственно на поверхности слоя твердого раствора с помощью тонкого термозонда. Результаты измерений четырех исследуемых типичных образцов даны в таблице. Из таблицы видно существенное различие в свойствах образцов, выращенных на подложках GaSb (образцы 1 и 2) и InAs (образцы 3 и 4). Прежде всего, для нелегированных слоев твердых растворов GaInAsSb, изопериодных с GaSb, знаки ЭДС Холла и термоэдс указывали на дырочный тип проводимости, а для нелегированных слоев твердых растворов такого же состава, но изопериодных с InAs, знак ЭДС Холла соответствовал электронному типу проводимости. В то же время знак носителей тока по термоэдс на поверхности структуры указывал на дырочный тип проводимости в эпитаксиальном слое.

Величина холловской подвижности, рассчитанная по формуле (1), для гетероструктур GaInAsSb/GaSb составляла 2000–2600  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$  и соответствовала дырочному типу проводимости, тогда как в гетероструктурах GaInAsSb/InAs достигала высоких значений

Параметры образцов  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ , выращенных на подложках GaSb и InAs.  $T = 77$  К,  $H = 2$  кЭ

Номер образца	Состав		Тип проводимости		$\sigma, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
	$x$	$y$	термоэдс	Холл	
1	0.16	0.14	$p$	$p$	1.9
2	0.22	0.19	$p$	$p$	2.8
3	0.17	0.22	$p$	$n$	70
4	0.20	0.24	$p$	$n$	54

Таблица (продолжение).

Номер образца	$R, \text{см}^3/\text{Кл}$	$u, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$B_r$	Концентрация, $\text{см}^{-3}$	Подложка
1	1200	1950	1.1	$6.0 \cdot 10^{15}$	GaSb:Pb
2	1000	2600	1.2	$6.2 \cdot 10^{15}$	"
3	900	65000	0.06	-	InAs:Zn
4	700	38000	0.3	-	"

( $u_H = 40000-65000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77$  К) даже в образцах с дополнительным легированием, что скорее указывало на электронный тип проводимости. Температурные зависимости подвижности для образцов GaInAsSb/GaSb(InAs), представленные на рис. 2, позволяют считать, что основными механизмами рассеяния носителей тока в обоих случаях являются рассеяния на ионах примесей и колебаниях решетки.

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициента Холла  $R_H$  для твердых растворов GaInAsSb, выращенных на подложках GaSb и InAs. Как видно из рисунка, кривые температурной зависимости коэффициента Холла для эпитаксиальных слоев, изопериодных с GaSb, имеют три экспоненциальных наклона, соответствующих энергиям активации:  $E_{A1} = 0.01$  эВ (мелкие неконтролируемые примеси), а также  $E_{A2} = 0.035$  эВ и  $E_{A3} = 0.07$  эВ, которые связаны с двухзарядным акцепторным центром структурного дефекта типа вакансии Ga и Ga на месте Sb- $(V_{Ga}Ga_{Sb})^{++}$ . Такой ход коэффициента Холла ранее наблюдался в  $p$ -GaSb [9].

Однако для эпитаксиальных слоев, изопериодных с InAs, наблюдается совершенно иная температурная зависимость  $R_H$ . Как видно из рис. 3 (кривые 3 и 4), коэффициент Холла, рассчитанный на толщину эпитаксиального слоя, слабо зависит от температуры в интервале  $T = 77-200$  К и имеет один наклон, соответствующий энергии активации  $E_D = 0.004$  эВ, которая может быть приписана только мелким донорным уровням. Электропроводность  $\sigma$ , рассчитанная на толщину эпитаксиального слоя, в этих образцах была на порядок выше, чем в слоях твердых растворов GaInAsSb такого же состава, выращенных на GaSb (см. таблицу).

Совокупность этих данных может свидетельствовать о наличии электронного канала с высокой подвижностью носителей тока на гетерогранице  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs и его участия в проводимости и других эффектах. На существование электронного канала на гетерогранице

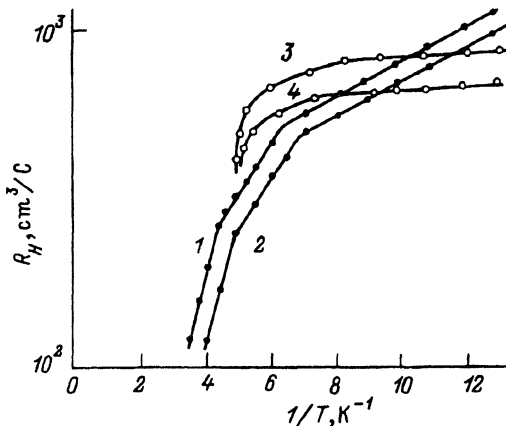


Рис. 3. Зависимость коэффициента Холла ( $R_H$ ) от температуры образцов: GaInAsSb/GaSb (1, 2) и GaInAsSb/InAs (3, 4). Нумерация кривых соответствует нумерации образцов в таблице.

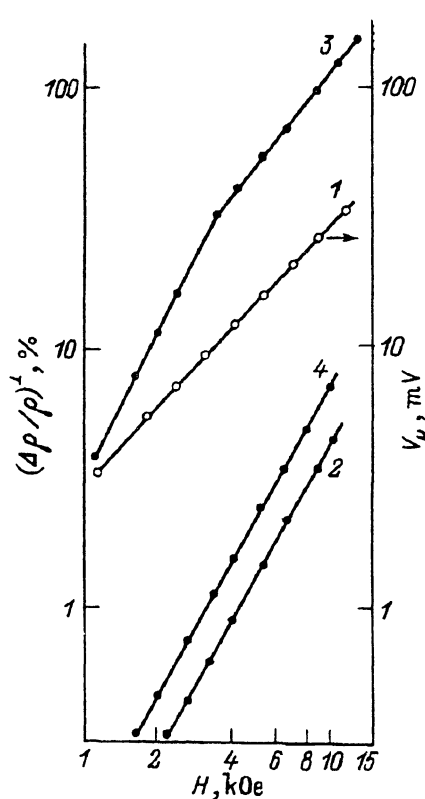


Рис. 4. Зависимость эдс Холла ( $V_H$ ) (1) и поперечного магнитосопротивления  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности магнитного поля при различной ориентации поля относительно гетерограницы (2, 3 —  $H \parallel n$ ; 4 —  $H \perp n$ ) для GaInAsSb/GaSb (2) и GaInAsSb/InAs (1, 3, 4).  $T = 77$  K.

в изотипной  $p$ - $p$ -гетероструктуре GaIn<sub>0.17</sub>AsSb/InAs указывает также недавнее наблюдение интенсивной интерфейсной электролюминесценции в такой гетероструктуре [10]. Действительно, если предположить, что параметры  $\sigma$ ,  $R_H$  и  $u_H$  слоя твердого раствора, выращенного на InAs, должны быть аналогичны параметрам четверного раствора, выращенного на GaSb, то по формуле для двухслойной модели можно определить подвижность в канале,  $u_H$ , зная параметры ( $u_0$ ,  $b_0$ ,  $\sigma_0$ ) всей структуры, выращенной на  $p$ -InAs:

$$u_H = \frac{u_0 - u_1 \frac{\sigma_1 b_1}{\sigma_0 b_0}}{1 - \frac{\sigma_1 b_1}{\sigma_0 b_0}}, \quad (3)$$

где  $u_1$ ,  $\sigma_1$  и  $b_1$  — данные для эпитаксиальных слоев аналогичного твердого раствора, выращенных на подложке GaSb (образцы 1, 2 в таблице). Так как толщина эпитаксиального слоя  $b_1$  всегда гораздо больше ширины переходной области на гетерогранице, можно считать, что  $b_1 = b_0$ . Вычисленная величина холловской подвижности  $u_H$  для всех образцов твердых растворов, выращенных на  $p$ -InAs, получается практически равной экспериментально измеренной подвижности  $u_0$ . Таким образом, участие электронного канала на гетерогранице в подвижности гетероструктуры GaInAsSb/InAs является определяющим. Это подтверждено и полевыми зависимостями  $V_H$  и  $\Delta\rho/\rho$ .

На рис. 4 (кривая 1) представлена зависимость ЭДС Холла ( $V_H$ ) от напряженности магнитного поля  $H$  для структур, выращенных на подложке InAs. Как видно из рисунка, наблюдается обычный пропорциональный рост  $V_H$  с полем, что свидетельствует о том, что в проводимости участвует один тип и один сорт носителей тока.

Зависимость поперечного магнитосопротивления  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ , вычисленного по формуле (2), от напряженности магнитного поля  $H$  представлена на рис. 4 (кривые 2-4). Как видно из рисунка, для образцов GaInAsSb/GaSb (кривая 2)  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  изменяется пропорционально  $H^2$  до 12 кЭ. Коэффициент магнитосопротивления

$$B_r = \frac{(\Delta\rho/\rho)^\perp}{(u_H \cdot H/c)^2} \approx 1, \quad (4)$$

что согласуется со значениями  $B_r$  для образцов  $p$ -типа, рассчитанными с учетом рассеяния на ионах примеси и решетки при участии легких и тяжелых дырок. В структурах GaInAsSb/InAs зависимость  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности магнитного поля (кривая 3) пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля в интервале значений  $H$  до 3 кЭ, пока выполняется условие слабого поля ( $u_H \cdot H/c < 1$ ). При более высоких полях рост  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  с полем замедляется. Коэффициент магнитосопротивления  $B_r$ , рассчитанный из квадратичной зависимости, во всех случаях был меньше 0.3 (см. таблицу), что соответствует расчетной величине для рассеяния электронов на ионах примеси и колебаниях решетки и согласуется с температурной зависимостью подвижности в интервале 77-200 К (рис. 2). Это также подтверждает участие в проводимости одного сорта носителей тока  $n$ -типа и отсутствие неоднородных скоплений примесей и дефектов [11].

При вращении образца в магнитном поле вокруг линий тока была обнаружена анизотропия поперечного магнитосопротивления в структурах GaInAsSb/InAs:  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  было максимально, когда  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{n}$  ( $\mathbf{n}$  — нормаль к слою) (рис. 4, кривая 3), а при  $\mathbf{H} \perp \mathbf{n}$  величина  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  на порядок уменьшается, при этом сохраняется квадратичная зависимость от магнитного поля вплоть до 12 кЭ (рис. 4, кривая 4). Для однородных объемных структур при вращении образца в магнитном поле вокруг линий тока поперечное магнитосопротивление должно оставаться постоянным. Наблюдаемая анизотропия характерна для размерных эффектов, когда длина свободного пробега электрона становится больше размеров исследуемого объекта. Длину свободного пробега ( $l$ ) можно оценить из подвижности

$$l = \frac{um_e^*v}{e}, \quad (5)$$

где  $v$  — тепловая скорость,  $m_e^*$  — эффективная масса,  $e$  — заряд электрона. Если предположить, что электронный канал расположен в InAs ( $m_e^* = 0.025m_0$ ), то в образцах с подвижностью  $u = 50000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$  длина свободного пробега должна быть порядка  $l \sim 600 \text{ \AA}$ . Следовательно, наблюдаемый эффект анизотропии поперечного магнитосопротивления может быть связан с существованием двумерного

или квазидвумерного слоя с высокой подвижностью носителей заряда на гетерогранице в разьединенной изотипной  $p$ - $p$ -гетероструктуре GaInAsSb/InAs.

Таким образом, получено высокое значение подвижности носителей ( $\mu_H = 65000$  см/В·с) в системе Ga $_{1-x}$ In $_x$ As $_y$ Sb $_{1-y}$ /InAs на основе широкозонных твердых растворов ( $x = 0.17$ ,  $y = 0.22$ ), которое обусловлено существованием электронного канала на гетерогранице между эпитаксиальным слоем и подложкой InAs, а также достаточно совершенной гетерограницей, полученной при выращивании эпитаксиальных слоев с малым количеством дефектов на подложке InAs.

Работа частично поддержана грантом № R46300 Международного научного фонда и Российского правительства.

### Список литературы

- [1] А.Э. Вочкарев, В.Н. Гульгазов, Л.М. Долгинов, А.А. Семин. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **23**, 1610 (1987).
- [2] R. Sankaran, G.A. Antypas. J. Cryst. Growth. **36**, 198 (1976).
- [3] Yu.P. Yakovlev, A.N. Baranov, A.N. Imenkov, M.P. Mikhailova. SPIE, 1510, 120 (1991).
- [4] Yu.P. Yakovlev, A.N. Baranov, A.N. Imenkov, A.A. Popov, V.V. Sherstnev. J. de Phys. IV Suppl. C4; J. de Phys. III, **4**, C4 (1994).
- [5] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, В.Г. Данильченко, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **12**, 1311 (1986).
- [6] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, M.P. Mikhailova, A.A. Rogachev, Yu.P. Yakovlev. Superlat. and Microstruct., **8**, 375 (1990).
- [7] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 678 (1995).
- [8] М.П. Mikhailova, A.N. Titkov. Semicond. Sci. Technol., **9**, 1279 (1994).
- [9] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, И.Н. Тимченко, З.И. Чугуева, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **23**, 780 (1989).
- [10] М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, К.Д. Моисеев, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 687 (1995).
- [11] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, А.Н. Дахно, В.Е. Джуртанов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24**, 1072 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

## High electron mobility in isotype $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs heterostructures

*T.I. Voronina, T.S. Lagunova, M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petesburg, Russia

We present a comparative study of galvanomagnetic properties of Ga $_{1-x}$ In $_x$ As $_y$ Sb $_{1-y}$  GaSb-enriched solid solutions grown lattice-match on GaSb and InAs substrates. A high value of Hall mobility ( $\mu_H = 50000-65000$  cm $^2$ /V·s at  $T = 77$  K) was obtained in structures with undoped and slightly doped quaternary layers grown on  $p$ -InAs while the mobility value only  $\mu_H = 2600$  cm $^2$ /V·s was obtained in the structures with GaInAsSb layers of the same composition grown on  $p$ -GaSb substrates. Effect of high mobility was explained by existence of a strong electron channel at the interface of the type II broken-gap  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs single heterojunction.